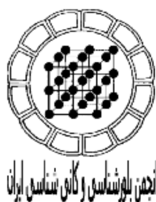
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال بیست و سوم، شماره‌ی اول، بهار ۹۴، از صفحهٔ ۴۳ تا ۵۴



عنصرسنجی، ساختار و نظم شبکه بلوری دولومیت بر پایه‌ی داده‌های سنگ نگاری، XRD و XRF (بررسی موردی دولومیت‌های سازند شهبازان، جنوب غرب استان کرمانشاه)

حسن محسنی*، مسعود عبداله‌پور، بهروز رفیعی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا همدان

(دریافت مقاله: ۹۲/۴/۲۶، نسخه نهایی: ۹۲/۹/۳۰)

چکیده: در این پژوهش دولومیت‌های سازند شهبازان به سن ائوسن در جنوب‌غربی کرمانشاه به روش سنگ‌نگاری، XRD و XRF مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پس از بررسی‌های صحرایی دو برش سطحی انتخاب و تعداد ۹۸ نمونه جمع‌آوری شدند. بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری چهار نوع دولومیت در منطقه‌ی مورد بررسی شناسایی شدند. با استفاده از نتایج XRD، و عنصرسنجی، درجه‌ی نظم بلوری و درصد دولومیت در نمونه‌ها تعیین شد. نتایج نشان دهنده‌ی تشکیل دولومیکریت‌ها و دولومیکروسپاریت‌ها در مرحله‌ی اولیه‌ی درونزادی (دریایی) در پهنه‌ی جزر و مدی است. دولواسپاریت‌ها طی مراحل درونزادی تأخیری و در اثر تکامل و تبلور مجدد دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاریت‌ها به وجود آمده‌اند. عنصرسنجی در دولواسپاریت‌ها (با میانگین ۵۲٫۹۸ مول درصد $CaCO_3$) نسبت به دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاریت‌ها (با میانگین ۵۷٫۶۹ درصد مولی $CaCO_3$) بالاتر است. درجه‌ی نظم بلوری در دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاریت‌ها (با میانگین ۰٫۶۸) نسبت به دولواسپاریت‌ها (با میانگین ۰٫۹۵) پایین‌تر است. میانگین نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} دولومیت‌های مورد بررسی در حدود ۰٫۷۳ است. چنین استنباط می‌شود که دولواسپاریت‌ها با توجه به چگونگی عنصرسنجی بهتر و درجه‌ی نظم بلوری بالاتر نسبت به دولومیکریت‌ها، دولومیکرواسپاریت‌ها در اثر تبلور دوباره و دگرسانی دیاژنتیکی دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاریت‌ها با افزایش اندازه بلورها و نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} شاره‌ی دولومیتی‌ساز به وجود آمده‌اند. از شواهد یاد شده و نیز با توجه به نبود کانی‌های تبخیری، می‌توان گفت که دولومیت‌های مورد بررسی در شرایط آب و هوای مرطوب و از شاره‌های با نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} پایین (احتمالاً کمتر از یک) شکل گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی: *عنصرسنجی؛ درجه‌ی نظم بلوری؛ دولومیت؛ سازند شهبازان؛ کرمانشاه.*

مقدمه

چگونگی تشکیل کانی دولومیت به‌عنوان یک کانی درونزادی سال‌ها مورد توجه سنگ‌شناسان رسوبی بوده است. یکی از روش‌هایی که در دهه‌های اخیر بسیار متداول شده است بهره‌گیری از روش‌های ژئوشیمیایی و ایزوتوپی است [۱]. اکنون این موضوع کاملاً روشن است که دولومیت $[Ca,Mg(CO_3)_2]$ از طریق واکنش‌های انحلال و تەنشینی دوباره، در جائی که سنگ‌آهک‌های پیشین در تعامل با شاره‌های غنی از منیزیم هستند، صورت می‌گیرد (واکنش ۱).



$$2CaCO_3 + Mg^{2+} \rightarrow Ca,Mg(CO_3)_2 + Ca^{2+} \quad (۱)$$

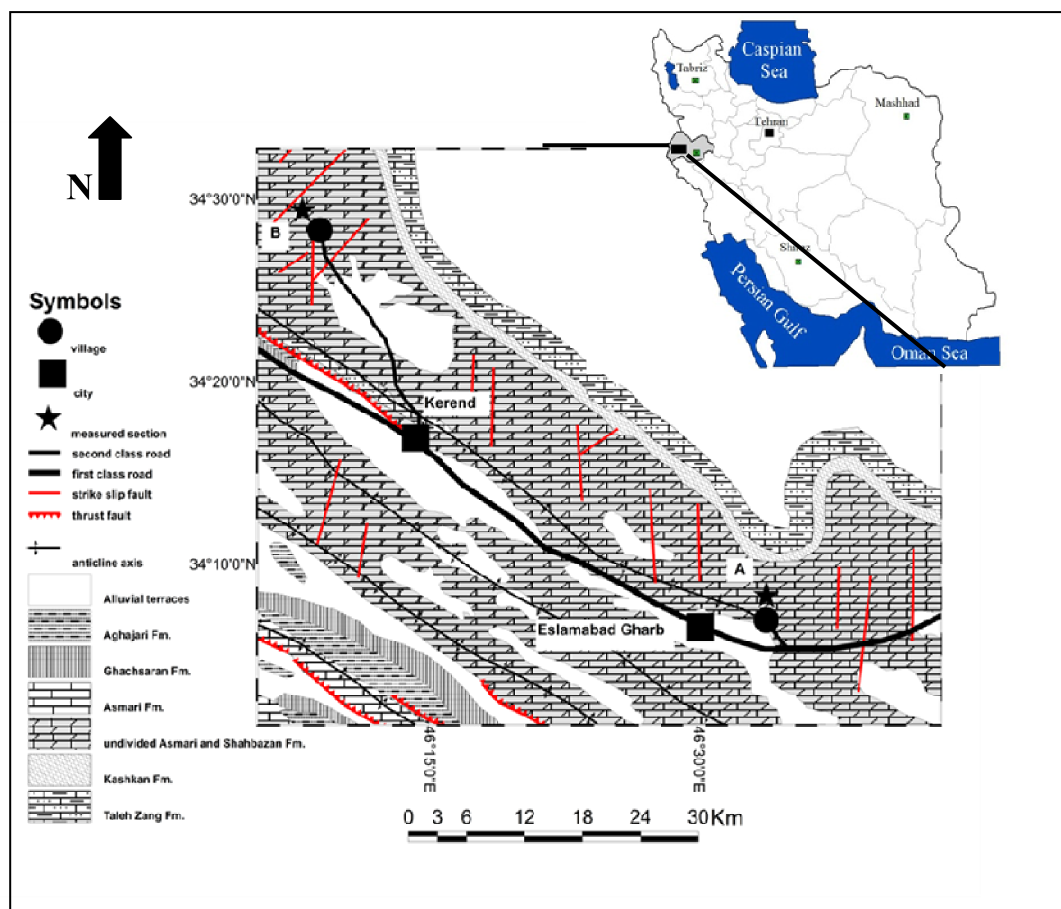
بیشتر بررسی‌های انجام شده در زمینه‌ی خاستگاه دولومیت، خاستگاه شاره‌های غنی از منیزیم، محیط تشکیل و یا فراوانی دولومیت در طول دوره‌های زمین‌شناسی متمرکز بوده‌اند. ولی شاخص‌های کنترل کننده‌ی ترکیب شیمیایی از قبیل عنصرسنجی و درجه‌ی نظم بلوری دولومیت کمتر مورد توجه بوده است [۲]. بیشتر پژوهشگران برای پی‌بردن به ارتباط

* نویسنده مسئول، تلفن-نمابر: ۳۸۳۸۱۴۶۰ (۰۸۱)، پست الکترونیکی: mohseni@basu.ac.ir

عنصرسنجی دولومیت با نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} شاره‌های خاستگاه تلاش زیادی کردند، ولی در یافتن ارتباط مستقیم بین شیمی شاره با ترکیب شیمیایی دولومیت موفقیتی کسب نکردند [۲]. دولومیت‌های با عنصرسنجی و درجه‌ی نظم بلوری بالا (دولومیت‌های ایده‌آل) در رسوب‌های عهد حاضر کمیاب‌اند. البته هنوز چگونگی روند تکاملی دولومیت‌های غنی از کلسیم و یا با درجه‌ی نظم بلوری ضعیف (دولومیت‌های غیراستکیومتریک) به دولومیت‌های استکیومتریک با گذشت زمان مورد بحث است [۳،۲]. هدف از این پژوهش بررسی دولومیت‌های سازند شهبازان از نگاه سنگ‌نگاری، عنصرسنجی و درجه‌ی نظم بلوری و یافتن ارتباط آن با نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} شاره‌های دولومیتی کننده و تعیین شرایط محیط تشکیل آن‌ها است.

مواد و روش‌ها

پس از بررسی عکس‌های هوایی و نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی کرند با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ [۴] دو برش سطحی انتخاب و به منظور شناخت انواع دولومیت، میزان و سازکارهای دولومیتی شدن مورد بررسی‌های صحرائی، اندازه‌گیری دقیق و نمونه‌برداری قرار گرفتند (شکل ۱). فاصله نمونه‌برداری به طور متوسط دو تا سه متر بوده است. در مجموع ۹۸ نمونه جمع-آوری و پس از برش به وسیله‌ی محلول آلیزایرین سرخ (Alizarin Red S.) به روش دیکسون (۱۹۶۵) رنگ‌آمیزی شدند [۵]. پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری از تعداد ۲۰ نمونه پودر تهیه و نمونه‌ها با XRD مدل Italstructure - APD2000 گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی سینا در شرایط 30 kV, 30mA, CuKα مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۱). همچنین تعداد ۸ نمونه نیز برای تعیین مقادیر عناصر اصلی Mg و Ca انتخاب و با دستگاه XRF مدل Magix Pro در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران آنالیز شدند (جدول ۲).



شکل ۱ نمایش بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ کرند که برش‌های مورد بررسی در آن نشان داده شده است (اقتباس از اژدری و شاه-وردی، [۴]).

جدول ۱ بافت، درصد مولی $CaCO_3$، درجه‌ی نظم بلوری دولومیت و درصد دولومیت در نمونه‌های مورد بررسی.

شماره نمونه	بافت	ضخامت شبکه‌ای پیک (۱۰۴) $d_{(104)}$(بر حسب آنگستروم)	مقدار $CaCO_3$ (بر حسب درصد مولی)	درجه نظم شبکه‌ی بلوری
برش اسلام‌آباد غرب				
KAB-42	دولومیکریت	۲/۹۱۰	۵۸	۰/۸۲
KAB-41	دولومیکرواسپاریت	۲/۹۱۰	۵۸	۰/۷۴
KAB-39	دولومیکریت	۲/۹۱۰	۵۸	۰/۶۵
KAB-37	دولومیکریت	۲/۹۱۰	۵۸	۰/۵۵
KAB-24	دولومیکریت	۲/۹۱۰	۵۸	۰/۸۲
KAB-21	دولومیکرواسپاریت	۲/۹۱۰	۵۸	۰/۸۹
KAB-15	دولومیکریت	۲/۹۱۰	۵۸	۰/۸۳
KAB-12	دولومیکریت	۲/۹۱۰	۵۸	۰/۵۵
KAB-2	دولومیکریت	۲/۹۱۰	۵۸	۰/۷۰
برش قورچ‌باشی				
KKQ-43	دولومیکرواسپاریت	۲/۹۱۳	۵۹	۰/۶۰
KKQ-40	دولومیکرواسپاریت	۲/۹۰۳	۵۵/۶۶	۰/۶۵
KKQ-36	دولواسپاریت	۲/۹۰۰	۵۴/۹۰	۰/۸۸
KKQ-30	دولواسپاریت	۲/۸۹۱	۵۱/۸۳	۰/۸۵
KKQ-26	دولواسپاریت	۲/۸۹۱	۵۱/۸۳	۱
KKQ-21	دولواسپاریت	۲/۸۹۱	۵۱/۸۳	۱/۱۸
KKQ-20	دولواسپاریت	۲/۸۹۱	۵۱/۸۳	۰/۷۸
KKQ-15	دولواسپاریت	۲/۸۹۱	۵۱/۸۳	۱/۱۵
KKQ-10	دولواسپاریت	۲/۹۰۰	۵۴/۹۰	۰/۸۳
KKQ-7	دولواسپاریت	۲/۹۰۰	۵۴/۹۰	۱
KKQ-3	دولومیکریت	۲/۹۰۳	۵۵/۶۶	۰/۴۴

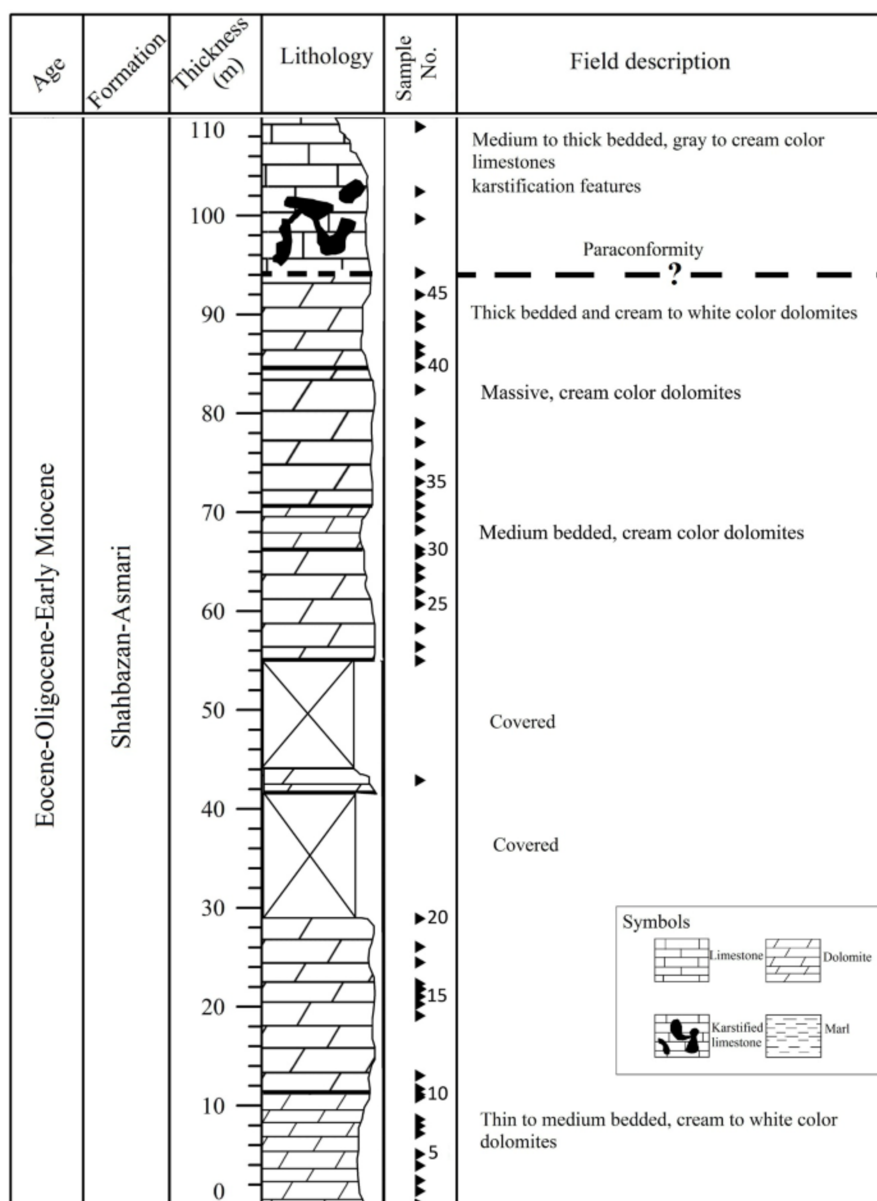
جدول ۲ درصد Mg^{2+} و Ca^{2+} و نسبت مولی Mg^{2+}/Ca^{2+} در دولومیت‌های سازند شهبازان.

شماره نمونه	بافت	%Mg	%Ca	مقدار $CaCO_3$ (برحسب درصد مولی)	نسبت مولی Mg/Ca
KAB-42	دولومیکریت	۱۰/۸۷	۲۵/۹۸	۵۷/۱۸	۰/۶۷
KAB-24	دولومیکریت	۱۱/۰۷	۲۴/۶۰	۵۷/۴۴	۰/۷۳
KAB-15	دولومیکریت	۱۰/۸۵	۲۴/۵۳	۵۷/۸۰	۰/۷۳
KAB-2	دولومیکریت	۱۱/۶۳	۲۴/۸۵	۵۶/۳۳	۰/۷۷
KKQ-26	دولواسپاریت	۱۱/۷۸	۲۵/۵۰	۵۶/۷۰	۰/۷۶
KKQ-16	دولواسپاریت	۱۱/۶۸	۲۷/۱۷	۵۸/۵۰	۰/۷۰
KKQ-10	دولومیکریت	۱۱/۶۸	۲۵/۴۸	۵۶/۸۹	۰/۷۶
KKQ-4	دولومیکریت	۱۲/۱۹	۲۵/۲۹	۵۵/۷۵	۰/۷۸

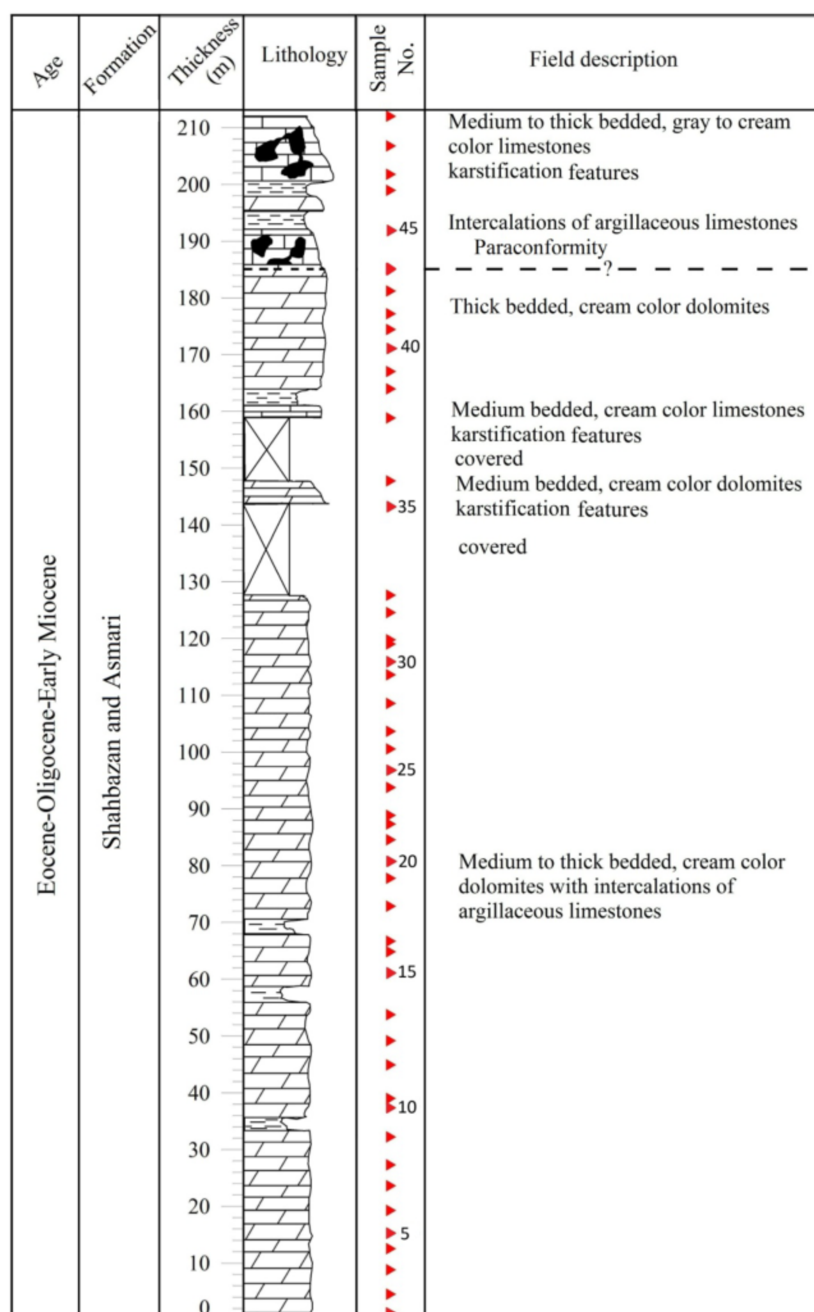
موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی برش‌های مورد بررسی

برش اسلام‌آباد غرب (A) در تاقدیس فردوس در ۵ کیلومتری شمال‌شرقی اسلام آباد غرب در نزدیکی روستای بدره‌ای با موقعیت جغرافیایی ″۳۳ ′۳۳ °۴۶ شرقی و ″۱۰ ′۰۷ °۳۴ شمالی واقع شده است (شکل ۱). سازند شهبازان در این برش شامل ۹۴ متر سنگ‌آهک و دولومیت متوسط تا ضخیم لایه به رنگ کرم تا سفید است و با مرز ناپیوسته (پیوسته‌نما) به وسیله‌ی سنگ‌آهک‌های متوسط تا ضخیم‌لایه سازند آسماری به سن الیگو- میوسن پوشیده شده است. سن سازند شهبازان ائوسن میانی تا پسین است (شکل ۲) [۶].

برش سطحی قورچباشی (B) در تاقدیس دالاهو در ۲۰ کیلومتری شمال‌غربی شهرستان کرندغرب مجاور روستای قورچ باشی با موقعیت جغرافیایی ″۱۵ ′۰۰ °۴۶ شرقی و ″۱۹ ′۲۶ °۳۴ شمالی واقع شده است (شکل ۱). سازندهای آسماری و شهبازان در این برش از یکدیگر غیر قابل تفکیک بوده و شامل سنگ‌آهک و دولومیت متوسط تا ضخیم لایه به رنگ خاکستری روشن، کرم تا سفید با میان‌لایه‌های نازک آهک‌مارنی به ضخامت ۲۱۰ متر دیده می شوند (شکل ۳).



شکل ۲ ستون چینه‌شناسی شهبازان در برش اسلام‌آباد غرب (نمونه‌های این برش با کد KAB معرفی شده‌اند).



شکل ۳ ستون چینه‌شناسی سازندهای آسماری و شهبازان (غیر قابل تفکیک) در برش قورچ باشی (برای علایم به شکل ۲ مراجعه شود) (نمونه‌های این برش با کد KKQ معرفی شده‌اند).

منطقه‌ی مورد بررسی بخشی از نوار چین‌خورده‌ی زاگرس است. دنباله‌های موجود در منطقه بیشتر چین خورده بوده و به طور متناوب از سنگ‌آهک یا دولومیت همراه با مارن و مارن‌های آهکی تشکیل شده است و با چینه‌بندی کم و بیش ظریفی مشخص می‌شود [۵] (شکل ۱). سازند شهبازان در مناطق شمال‌غرب حوضه زاگرس، به ویژه جنوب و جنوب‌غربی استان کرمانشاه از گسترش قابل ملاحظه‌ای برخوردار است.

سازند شهبازان در برش الگو شامل ۳۳۸٫۳ متر دولومیت و سنگ‌آهک‌های دولومیتی با رنگ سفید تا قهوه‌ای با سیمای ضخیم لایه است که به‌طور پیوسته بر روی سازند کشکان و به طور ناپیوسته زیر سازند آسماری قرار دارد و با سازندهای کشکان، تله‌زنگ، پابده و سازند جهرم ارتباط بین انگشتی دارد [۷،۶].

سنگ‌نگاری دولومیت‌ها

در این رده‌بندی مبنای اندازه بلورهای دولومیت، مقیاس ارائه شده توسط فولک است [۸] (شکل ۴). بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری و بر مبنای تلفیقی از رده‌بندی‌های بافتی فریدمن[۱] [۹]، گرگ و سیبلی[۲] [۱۰]، سیبلی و گرگ [۳] و مازولو[۳] [۱۱] در منطقه مورد بررسی چهار دسته دولوندمیت شناسایی شدند:

دولومیت خیلی ریز بلور یا دولومیکریت

اندازه‌ی بلورها در این نوع دولومیت از کوچکتر از ۴ میکرون تا ۱۶ میکرون (میانگین ۱۱ میکرون) است که به وسیله‌ی میکروسکوپ قطبشی برآورد شد، بلورها اغلب بی‌شکل و توزیع اندازه آن‌ها به‌صورت یک‌نمایی است. دولومیت‌ها قهوه‌ای تیره، تا خاکستری و متراکم اند. این نوع بافت معادل بافت زینوتاپیک فریدمن [۹]، بلورهای زینوتاپیک[۴]- A گرگ و سیبلی [۱۰]، بافت غیرمسطح سیبلی و گرگ [۳] و بافت غیرمسطح بی‌شکل[۵] مازولو [۱۱] است (شکل ۵- الف). در این دولومیت‌ها بقایای میان آواری و بافت‌های رسوبی اولیه مانند بافت ورقه‌ای جلبکی، دولومیتی‌شدن انتخابی پلوئیدها، ماتریکس ریزدانه گلی و خرده‌های اسکلتی دیده می‌شود. به طور کلی اندازه‌ی بلورهای دولومیت می‌تواند برای تشخیص دولومیت‌های دیاژنتیک اولیه از ثانویه مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به بافت و اندازه بلورهای بسیار ریز و حفظ شدن بافت‌های رسوبی اولیه به نظر می‌رسد که دولومیت‌های نوع اول در شرایط دمای کم و نزدیک سطح تشکیل شده‌اند. اصولاً این دولومیت‌ها همزمان با رسوب‌گذاری یا در مراحل اولیه دیاژنز در گستره‌ی بالای جزر و مدی تا بخش بالای گستره‌ی بین جزر و مدی تشکیل شده [۱۲].

دولومیت ریز بلور یا دولومیکرواسپاریت

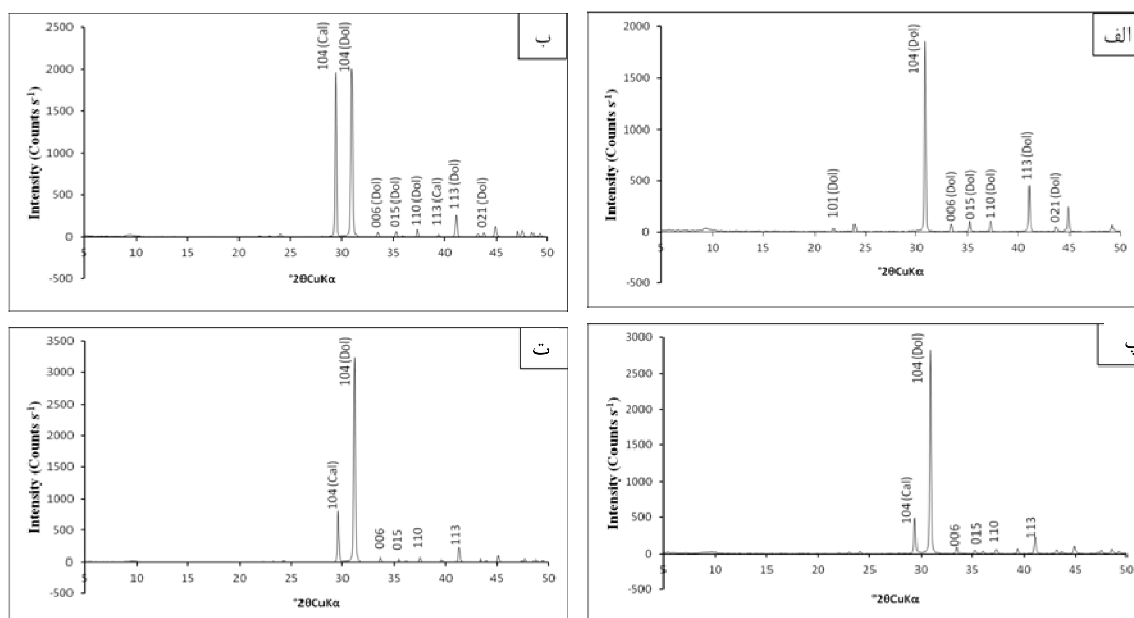
اندازه بلورها در این نوع دولومیت‌ها از ۱۶ تا ۶۲ میکرون (میانگین ۴۵ میکرون) متغیر بوده و بلورها بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار با مرزهای بین‌بلوری مستقیم هستند و توزیع آن‌ها به‌صورت تکنمایی است. این نوع دولومیت معادل بافت ایدیوتاپیک فریدمن [۹]، ایدیوتاپیک[۶]- p گرگ و سیبلی [۱۰] و دولومیت مسطح پورفیروتاپیک[۷] مازولو [۱۱] می‌باشد. دولومیکرواسپاریت‌ها معمولاً از جانشینی سنگ‌های آهکی به‌وجود می‌آیند. ممکن است این فرایند به صورت ناقص و یا کامل انجام پذیرد. به نظر می‌رسد حضور نفوذی‌های گل آهکی باعث ایجاد مراکز ابری آن‌ها در مراحل اولیه رشد بلورها شده است. در اغلب نمونه‌های مورد بررسی، دولومیت‌های ریز بلور دارای مرزهای شکل‌دار و مسطح بوده و سیمان اسپاری فضاهای بین بلورهای لوزی شکل دولومیت را پر کرده‌اند (بافت ایدوتاپیک-E گرگ و سیبلی [۱۰] و بافت مسطح شکل‌دار[۴] سیبلی و گرگ، [۳]). در بعضی از دولومیت‌های دارای مرزهای مسطح شکل‌دار، لوزی‌های دولومیتی درون سیمانی از کلسیت اسپاری شناور بوده و بافت پوئی‌کیلوتاپیک[۵] فریدمن [۹] را به وجود آورده‌اند [۱۲] (شکل۵- ب).

دولومیت متوسط بلور یا دولواسپاریت

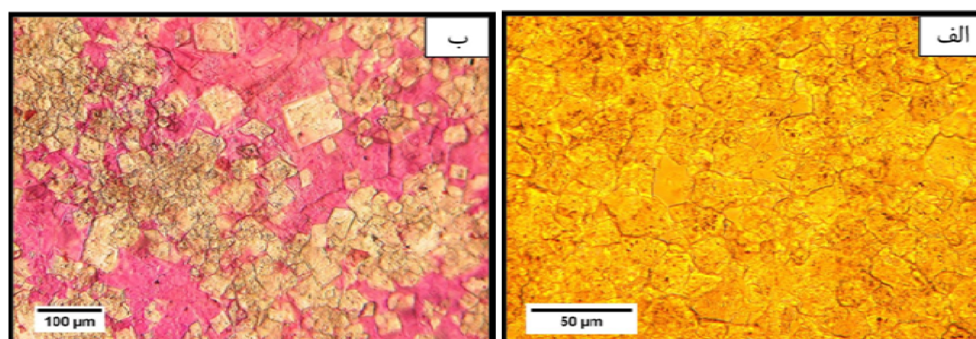
اندازه‌ی بلورها در این نوع دولومیت از ۷۰ تا ۲۵۰ میکرون (میانگین ۲۲۰ میکرون) در تغییر است. بلورها اغلب بی‌شکل و دارای مرزهای بین‌بلوری منحنی‌شکل و زبانه‌ای‌اند، اما در برخی موارد به صورت نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار با مرزهای مشترک بین بلوری مستقیم بوده و حتی فصل مشترک سطوح بلوری به خوبی حفظ شده است. توزیع اندازه‌ی بلورها به صورت چندنمایی است (شکل ۶- الف). این دسته از دولومیت هیپ-ایدیوتاپیک[۳] فریدمن [۹]، ایدیوتاپیک- S گرگ و سیبلی [۱۰] و دولومیت با بافت مسطح نیمه شکل‌دار[۴] سیبلی و گرگ [۳] و مازولو [۱۱] تشکیل شده است. دولومیت نوع سوم باعث تخریب بافت‌های اولیه رسوبی شده و در نتیجه شناسایی اشکال اولیه رسوبی بسیار مشکل است. به عقیده‌ی مورو، دولومیت‌های دارای مرزهای مسطح نیمه‌شکل‌دار و در نتیجه رشد بلورها به آرامی شکل می‌گیرد. همچنین بر اساس نظریه سیبلی و گرگ [۳]، بافت مسطح نیمه شکل‌دار نتیجه‌ی رشد آرام بلورها با جریان پیوسته‌ای از شاره‌های دولومیتی‌ساز در دمای پایین است. بنابراین دولومیت نوع سوم بیانگر جانشینی درونزادی سنگ آهک‌های قبلی و یا تبلور دوباره‌ی دولومیت‌های تشکیل شده اولیه زیر دمای بحرانی یعنی کمتر از ۶۰ درجه سانتیگراد می‌باشد [۱۲].

1- Friedman
2- Sibley & Gregg
3- Mazzullo
4- Xenotopic
5- Nonplanar-A
6- Idiotopic
7- Planar-P

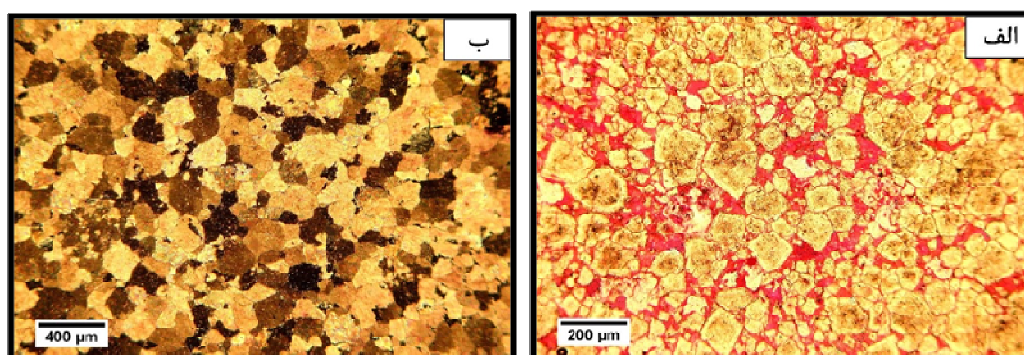
1- Planar-E
2- Poikilotopic
3- Hypidiotopic
4- Planar-S



شکل ۴ نمودار XRD انواع دولومیت‌های مورد بررسی الف) دولومیکریت (KAB-42)، ب) دولومیکروسپاریت (KAB-41)، پ) دولواسپاریت با خاموشی مستقیم (KKQ-36)، ت) دولواسپاریت با خاموشی موجی (KKQ-20).



شکل ۲ الف) دولومیکریت‌های سازند شهبازان با بافت غیرمسطح بی‌شکل (PPL، برش اسلام‌آباد غرب، KAB-42)، ب) نمایی از دولومیت‌های ریز بلور یا دولومیکروسپاریت‌های سازند شهبازان با بافت مسطح شکل‌دار (لوزی شکل) که در زمینه‌ای از سیمان کلسیت اسپارایتی شناورند (نمونه رنگ‌آمیزی شده ، PPL، برش اسلام‌آباد غرب، KAB-34).



شکل ۳ الف) دولومیت‌های بلوری متوسط در سازند شهبازان با بافت مسطح نیمه شکل‌دار با خاموشی مستقیم که در زمینه‌ای از کلسیت اسپاری شناورند. (نمونه رنگ‌آمیزی شده، PPL، برش قورچباشی، KKQ-36)، ب) دولومیت‌های متوسط تا درشت بلور با خاموشی موجی سازند شهبازان با بافت غیرمسطح بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار. (نمونه رنگ‌آمیزی شده، XPL، برش قورچباشی، KKQ-21).

دولومیت‌های متوسط تا درشت بلور

اندازه‌ی بلورها در این نوع دولومیت از ۶۰ تا ۵۰۰ میکرون (میانگین ۲۷۰ میکرون) در تغییر است که موجب توزیع اندازه-ی بلورها به صورت چندنمایی شده است. بلورها اغلب بی‌شکل با مرزهای بین‌بلوری منحنی‌بوده و خاموشی موجی دارند، اما در مواردی به‌صورت نیمه شکل‌دار و گاه با مرزهای مشترک بین‌بلوری مستقیم دیده شده‌اند، بنابراین تشخیص آن‌ها از دولومیت‌های نوع سوم (دولومیت‌های متوسط بلور یا دولواسپاریت) مشکل است (شکل ۶- ب). در این‌گونه موارد تفکیک دولومیت‌ها بر مبنای حفظ تعداد بیشتری از فصل مشترک سطوح بلوری در دولومیت‌های نوع سوم و خاموشی موجی در دولومیت‌های نوع چهارم بوده است. این نوع بافت معادل بافت زینوتاپیک فریدمن [۹]، بلورهای زینوتاپیک- A گرگ و سیبلی [۱۰]، بافت غیر مسطح سیبلی و گرگ [۳] و بافت غیرمسطح بی‌شکل مازولو [۱۱] است [۱۲].

پراش پرتو ایکس (XRD)

پراش پرتو ایکس اطلاعاتی از عنصرسنجی، ساختار و درجه‌ی نظم بلوری دولومیت‌ها در اختیار می‌گذارد. آنالیزهای پراش پرتو ایکس نیز برای اطمینان از خالص بودن نمونه‌ها و تعیین مقدار آلودگی نمونه‌ها به کانی‌های رسی به منظور انتخاب نمونه‌های مناسب برای بررسی‌های شیمیایی و ایزوتوپی بسیار اهمیت دارد [۱۳]. برای جلوگیری از بروز خطا، نمونه‌ها باید فاقد رس یا مقادیر محدود رس (٪ ۵-۲) باشند. از پودر اکسید روی (ZnO) به عنوان یک استاندارد درونی برای تنظیم دقیق موقعیت قله‌های انکساری و بر طرف کردن خطای احتمالی ناشی از جابه‌جائی قله‌ها استفاده شد. داده‌های پراش پرتو ایکس در بازه‌ی 2θ بین $5-50^\circ$ ثبت شدند. تعداد ۲۰ نمونه برای آنالیز پراش پرتو ایکس انتخاب شدند و به صورت پودر درآمدند. این مرحله نیازمند توجه و دقت فراوانی است، بدین ترتیب که اختلاف در اندازه‌ی ذرات نمونه‌های پودر شده روی نسبت مساحت قله‌های حاصل از پراش پرتو ایکس تأثیرگذار خواهد بود. پودر نمونه‌ها به مدت ۱۰ الی ۲۰ دقیقه، ذراتی در حدود ۵ میکرون فراهم می‌کند [۱۴]. نمودارهای حاصل از آنالیزهای پراش پرتو ایکس در محاسبه نسبت‌های کلسیت و دولومیت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل ۲ نمودار XRD چهار دسته دولومیت مورد بحث ارائه شدند و در ادامه نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل نمودارهای XRD آمده است.

عنصرسنجی دولومیت

عنصرسنجی دولومیت‌های مورد بررسی با توجه به موقعیت دقیق قله (۱۰۴) از روی نمودارهای XRD محاسبه شد. درصد مولی $CaCO_3$ (N_{CaCO_3}) در دولومیت‌های مورد بررسی با توجه به موقعیت قله (۱۰۴)، ضخامت شبکه‌ای $d_{(104)}$ بر حسب آنگستروم و از طریق معادله‌ی ارائه شده توسط لامسدن[۶] محاسبه شد (معادله ۲). نمودار شکل ۷ درصد مولی $CaCO_3$ در دولومیت‌های سازند شهبازان را با توجه ضخامت شبکه‌ای $d_{(104)}$ نشان می‌دهد (شکل ۷):

$$N_{CaCO_3} = Md_{(104)} + B \qquad (۲)$$

که در آن M برابر ۳۳۳٫۳۳ و B برابر ۹۱۱٫۹۹- است. ضخامت شبکه‌ای $d_{(104)}$، برای ۵۰ درصد $CaCO_3$، Å ۲٫۸۸۶ و برای ۵۵ درصد $CaCO_3$، Å ۲٫۹۰۱ به دست آمد.

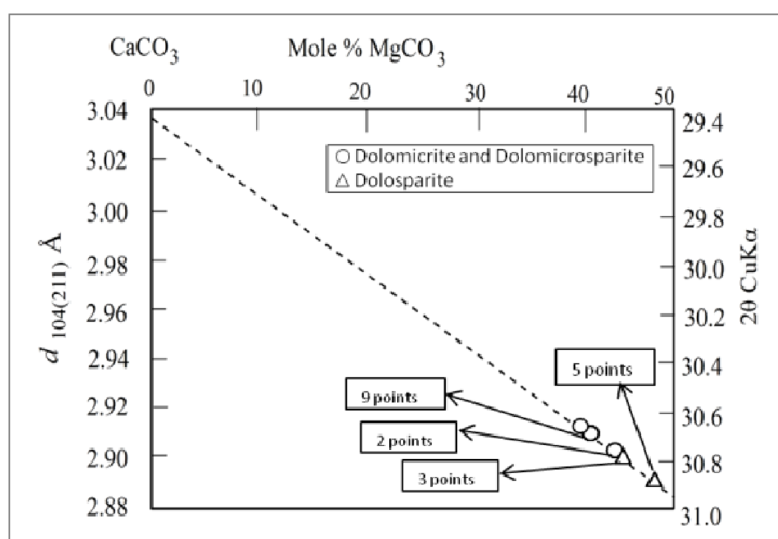
لامسدن و کیماهاوسکی[۷] (۱۹۸۰) و مورو[۲] (۱۹۷۸) سه گروه مهم از دولومیت را به شرح زیر بر اساس عنصرسنجی، بافت و حضور یا عدم حضور تبخیری‌ها معرفی کرد.

۱) دولومیت‌های دانه شکری و درشت بلور نزدیک به حالت عنصرسنجی (۵۰-۵۱ درصد مولی $CaCO_3$)، ۲) دولومیت‌های ریز بلور بدون حضور تبخیری‌ها و غنی از کلسیم (۵۴-۵۶ درصد مولی $CaCO_3$)، ۳) دولومیت‌های ریز بلور همراه با تبخیری‌ها و نزدیک به حالت عنصرسنجی (۵۱-۵۲ درصد مولی $CaCO_3$) هستند [۱۵،۱۴].

نتایج حاصل از آنالیز پراش پرتو ایکس دولومیت‌های سازند شهبازان حاکی از این است که دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاریت غیر عنصرسنجی (میانگین ۵۷٫۶۹ درصد مولی $CaCO_3$) و دولواسپاریت‌ها نزدیک به حالت عنصرسنجی (میانگین ۵۲٫۹۸ درصد مولی $CaCO_3$) هستند (جدول ۱). بر این اساس دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاریت‌ها نزدیک به گروه دوم از رده‌بندی مزبور قرار می‌گیرند. بررسی‌ها نشان دهنده‌ی تشکیل دولومیت‌های کلسیم‌دار گروه ۲ (غیر

6- Lumsden
1- Lumsden, and Chimahusky
2- Morrow
3- Mixing zone

عنصرسنجی) در شرایط آب و هوای مرطوب و از شاره‌های با نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} پایین از قبیل منطقه‌ی اختلاط آب‌های جوی و دریایی[۳] است. این گروه از دولومیت‌ها حاصل مراحل اولیه دیاژنز بوده و خاستگاه آن‌ها نزدیک سطح زمین است. دولواسپاریت با توجه به چگونگی عنصرسنجی بهتر نسبت به دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاریت‌ها نزدیک به گروه اول از رده‌بندی فوق قرار می‌گیرند. این گروه از دولومیت‌ها حاصل درونزادی تأخیری هستند و منعکس‌کننده رشد آهسته از محلول‌های رقیق با نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} پایین (احتمالاً کمتر از یک) و احتمالاً دماهای بالا (بالاتر از ۶۰ درجه سانتیگراد) هستند. به نظر می‌رسد این محلول‌های رقیق از اختلاط آب-های جوی با آب‌های فریاتیک دریایی در شرایط آب و هوای مرطوب شکل گرفته‌اند. بررسی‌های سنگ‌نگاری و نتایج XRD عدم وجود کانی‌های تبخیری را در دولومیت‌های مورد بررسی تایید می‌کند که نشانه‌ی فرایند دولومیتی شدن در منطقه‌ی اختلاط آب‌های جوی و فریاتیک دریایی باشد. مهمترین دلیل عدم نهشته شدن دولومیت از آب دریا، فراوانی فوق العاده یون سولفات در آب دریا است. عمل کاهش غلظت یون سولفات در آب دریا و نیز آب‌های محبوس بین دانه‌ای (فریاتیک دریایی) به دلیل اختلاط با آب‌های جوی (به شدت فقیر از یون سولفات) صورت می‌گیرد [۱۶]. فوچتبایور و گلدشمیت (۱۹۶۵) معتقدند دولومیت‌های شکل گرفته در شرایط آب و هوای گرم و خشک (شوری بالا و نرخ تبخیر بالا)، عنصرسنجی بالاتری نسبت به دولومیت‌های شکل گرفته در شرایط آب و هوای مرطوب و آب دریای معمولی (شوری نرمال و نرخ تبخیر پایین) دارند. در شرایط تبخیری اغلب یون کلسیم موجود در شاره برای شرکت در ساختار کانی‌های تبخیری (انیدریت و ژیپس) مصرف شده و میزان آن در شاره باقی‌مانده کاهش پیدا می‌کند. بررسی‌های فوچتبایور نشان دهنده‌ی ارتباط بین دولومیت‌های با عنصرسنجی بالاتر و شرایط آب و هوای گرم و خشک (نرخ تبخیر بالا) بود. هم‌چنین وی همراهی کانی انیدریت را با این نوع دولومیت‌ها، در بررسی‌های سنگ‌نگاری، به عنوان شاهد ادعای خود معرفی کرد. وی معتقد است که مقدار کلسیم دولومیت با شوری شاره‌ی دولومیتی کننده ارتباط دارد. او ثابت کرد که در آب و هوای مرطوب دولومیت‌های (غیر استکیومتریک) غنی از کلسیم غالب بوده و در محیط‌های خشک اغلب دولومیت‌ها تقریباً استکیومتریک هستند [۱۴]. از این رو می‌توان ادعا کرد که دولومیکرایت‌ها و دولومیکرواسپارایت‌های که دارای عنصرسنجی پایین هستند، طی مراحل اولیه دیاژنز (دریایی) و در شرایط آب و هوایی مرطوب شکل گرفته‌اند. فرایندهای دیاژنز تأخیری که منعکس کننده‌ی تأثیر شاره‌های حاصل از اختلاط آب‌های جوی و دریایی است، باعث دگرسانی و تبلور مجدد دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاایت‌ها شده است. این امر به نوبه‌ی خود موجب افزایش عنصرسنجی در دولواسپاریت‌ها شده است.



شکل ۴ عنصرسنجی دولومیت‌های منطقه مورد بررسی با توجه به موقعیت و ضخامت شبکه‌ای قله (۱۰۴).

درجه‌ی نظم بلوری دولومیت

پراش پرتو ایکس برای تعیین میزان نظم شبکه بلوری دولومیت ارزش فراوانی دارد. در نتیجه تفکیک کاتیون‌ها به حالت صفحه‌ای در بلورهای دولومیت یک مجموعه بازتاب‌های منظم ساختاری در ارتباط با ضخامت شبکه‌ای d_{021}، d_{015} و d_{104} با استفاده از پراش پرتو ایکس آشکار می‌شود (شکل ۸). ارتفاع و شدت نسبی این قله‌های منظم می‌تواند در اندازه‌گیری درجه‌ی نظم شبکه‌ی بلوری دولومیت مورد استفاده قرار گیرد. درجه‌ی نظم شبکه‌ی بلوری دولومیت، بیشترین نسبت شدت قله (۰۱۵) به شدت قله (۱۱۰) است. این نسبت با افزایش درجه‌ی نظم بلوری دولومیت، افزایش می‌یابد (معادله ۳).

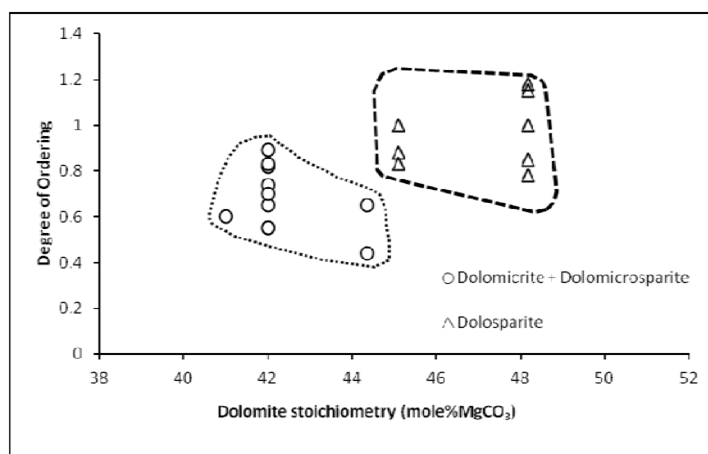
$$Degree\ of\ ordering = \frac{Intensity\ 015\ peak}{Intensity\ 110\ peak} \quad (۳)$$

بررسی‌ها نشان می‌دهد که دولومیت‌های غیر ایده‌آل (غیر عنصرسنجی) و غنی از کلسیم اغلب دارای درجه‌ی نظم شبکه-ی بلوری کمتری نسبت به دولومیت‌های ایده‌آل اند [۱۴]. نتایج حاصل از XRD نشان‌دهنده‌ی درجه نظم شبکه‌ی بلوری بالاتر دولواسپاریت‌ها (میانگین ۰/۹۵) نسبت به دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاریت‌ها (میانگین ۰/۶۸) است و تائیدکننده بررسی‌های انجام شده توسط محققان است (جدول ۱).

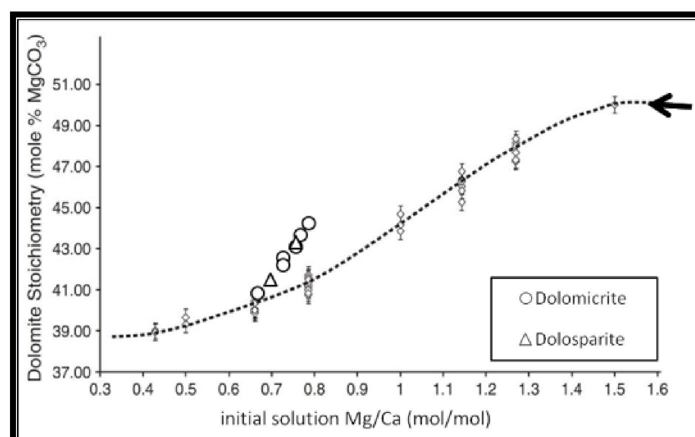
دولومیت‌های ایده‌آل به دلیل انرژی آزاد بسیار پایینی که دارند، از نظر ترمودینامیکی بسیار پایدار بوده و دارای قابلیت انحلال کم هستند [۲، ۱۱]. بر اساس پژوهش‌های لند (۱۹۸۵) دولومیت‌های هولوسن و عهد حاضر غنی از کلسیم بوده و نظم بلوری کمی دارند. این دولومیت‌ها از نظر ساختار و ترکیب، ناپایدار و یا نیمه‌پایدار بوده و با گذشت زمان تمایل دارند به حالت پایدار و منظم‌تری برسند [۲]. با توجه به این‌که دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاریت‌ها سازند شهبازان بیشتر غنی از کلسیم و دارای نظم بلوری پایین هستند (به نظر لند ناپایدارند)، انتظار می‌رود با گذشت زمان و پیشرفت دیاژنز به حالت پایدار، نظم بلوری بالاتر و عنصرسنجی بالاتر (دولواسپاریت‌ها) برسند.

تعیین مقدار عناصر اصلی و نسبت Mg2+/Ca2+ سیال منشأ

نتایج حاصل از آنالیز XRF (جدول ۲) پودر نمونه‌ها نشان می-دهد که دولومیت‌های مورد بررسی اغلب غنی از کلسیم هستند. البته با توجه به حضور مقادیر کم سیمان کلسیتی به صورت پر کننده تخلخل‌ها نتایج حاصل از این آنالیز چندان قابل اعتماد نیستند. مقادیر Ca^{2+} در دولومیت‌های مورد بررسی بین ۲۴/۵ تا ۲۷/۱ درصد (میانگین ۲۵/۴ درصد) و مقادیر Mg^{2+} بین ۱۰/۸ تا ۱۲/۱ درصد (میانگین ۱۱/۴ درصد) درتغییر است. میانگین نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} شاره‌ی دولومیتی-کننده در حدود ۰/۷۳ یعنی کمتر از یک تعیین شد (جدول ۲). کازمارک و سیبلی (Kaczmarek and Sibley) (۲۰۱۱) نشان دادند که در شرایط آزمایشگاهی دولومیت‌های غنی از کلسیم از محلول‌های با نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} پایین و دولومیت‌های غنی از منیزیم از محلول‌های با نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} بالاتر به وجود می-آیند. هرچند بین نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} اولیه محلول و عنصرسنجی دولومیت ارتباطی وجود دارد، اما این ارتباط مستقیم نیست [۲] (شکل ۹).



شکل ۵ نمایش عنصرسنجی نسبت به درجه نظم بلوری. افزایش عنصرسنجی در دولواسپاریت‌ها به احتمال زیاد ناشی از تبلور مجدد دولومیکریت و دولومیکرواسپاریت‌ها است. اما تغییرات درجه نظم بلوری مستقل از تغییرات عنصرسنجی است.



شکل ۶ روند تغییرات عنصرسنجی دولومیت‌های تشکیل شده از آهک‌های اولیه در شرایط آزمایشگاهی در ارتباط با نسبت مولی +Mg2+/Ca2 سیال اولیه (علامت پیکان)، با توجه به ارتباط بین عنصرسنجی و نسبت ++Mg++/Ca شاره‌ی اولیه، نشان می دهند که دولومیت‌های سازند شهبازان از شاره‌هایی با نسبت +Mg2+/Ca2 پایین (در حدود ۱) شکل گرفته باشند.

برداشت

با توجه به بررسی‌های سنگ‌نگاری بر اساس شکل، اندازه‌ی بلورها و ویژگی‌های بافتی چهار نوع دولومیت در سازند شهبازان شناسایی شدند. نتایج حاصل از XRD نشان‌دهنده‌ی سنگ‌نگاری بالای دولواسپاریت‌ها (میانگین ۵۲٫۹۸ درصد $CaCO_3$) نسبت به دولومیکریت‌ها و دولومیکروسپارایت‌ها (میانگین ۵۷٫۶۹ درصد $CaCO_3$) هستند. همچنین این نتایج نشان‌دهنده‌ی درجه‌ی نظم بلوری بالاتر دولواسپاریت‌ها (میانگین ۰٫۹۵) نسبت به دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاریت‌ها (میانگین ۰٫۶۴) است، بنابراین با توجه به شواهد فوق می‌توان گفت که دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپاریت‌های تشکیل شده در مراحل اولیه دیاژنز (دریایی) با توجه به وضعیت عنصرسنجی ضعیف و درجه‌ی نظم بلوری پایین ناپایدار بوده و همین امر موجب شده، که طی مراحل دیاژنز تأخیری و احتمالاً تأثیر شاره‌های حاصل از اختلاط آب‌های با خاستگاه جوی و دریایی، به دولواسپاریت‌ها با عنصرسنجی و نظم بلوری بالا تبلور مجدد پیدا کنند. با توجه به نتایج حاصل از XRF نسبت مولی Mg^{2+}/Ca^{2+} در دولومیت‌های سازند شهبازان کمتر از یک (در حدود ۰٫۷۳) تعیین شد. با توجه به این که ترکیب دولومیت در ارتباط با شیمی شاره‌های دولومیتی کننده است، می‌توان گفت که دولومیت‌های سازند شهبازان از شاره‌هایی رقیق با نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} در حدود یک و در شرایط آب و هوایی مرطوب شکل گرفته‌اند. بر پایه شواهدی از قبیل نبود کانی‌های تبخیری و نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+}، خاستگاه شاره‌های دولومیتی‌ساز در سازند شهبازان را به اختلاط آب‌های با خاستگاه جوی و دریایی نسبت داد.

قدردانی

از حوضه‌ی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا و نیز سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه به خاطر تامین هزینه‌های این پژوهش و جناب آقای مهندس کمال طاهری و مهندس فتح الله محسنی پور از سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه به خاطر کمک و همراهی در انتخاب مکان برش های صحرایی، از آقایان مرادی، حسنی، مصلحی، ابراهیمی و برزوئی دانشجویان زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی سینا به خاطر کمک در برداشت‌های صحرایی سپاسگزاری می‌شود. از داوران محترم که با نکته سنجی و ارائه پیشنهادات به رفع کاستی‌های این مقاله کمک فراوانی کرده‌اند بسیار سپاسگزاریم.

مراجع

[۱] میراب شبستری غ.، آدابی م. ح.، *"کاربرد اطلاعات ژئوشیمیایی در تشخیص منشأ و تعیین دمای محیط تشکیل دولومیت‌های سازند سلطانیه در شمال سمنان"*، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۱ (۱۳۸۱)، ص ۳-۱۶.

[2] Kaczmarek S.E., Sibley D.F., *"On the evolution of dolomite stoichiometry and cation order during high-temperature synthesis experiments: An alternative model for the geochemical evolution of natural dolomites"*, Journal of Sedimentary Geology, v. 240, (2011), pp. 1-11.

[3] Sibley D.F., Gregg J.M., *"Classification of dolomite rocks textures"*, Journal of Sedimentary Geology, v. 57, (1987), pp. 967–975.

[۴] اژدری ا.، شاه وردی ت.، *"نقشه زمین شناسی ۱۰۰۰۰۰/۱ کرند"*، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور، (۱۳۸۶)، تهران.

[5] Dickson J.A.D., *"A modified staining technique for carbonates in thin section",* Nature, (1965), v. 205, p. 587.

[6] Al-Sharhan A. S., Nairn A. E., *"Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East"*, Elsevier Science B.V., (1997), 843 p.

[۷] آقانباتی ع.، *"زمین شناسی ایران"*، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور، تهران، (۱۳۸۳)، ۷۰۷ص.

[8] Folk R. L., *"Spectral subdivision of limestone types.* In: *Classification of Carbonate Rocks"*, Ham, W. E. (Ed.), AAPG Mem. 1, (1962), pp. 62–84.

[9] Friedman G. M., *"Terminology of crystallization textures and fabrics in sedimentary rocks"*, Journal of Sedimentary Geology, v. 35, (1965), pp. 643–655.

[10] Gregg J. M., Sibley D. F., *"Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture"*, Journal of Sedimentary Geology, v. 54, (1984), p. 908–931.

[11] Mazzullo S.J., *"Geochemical and neomorphic alteration of dolomite: a review"*, Carbonates and Evaporites, v. 7, No. 1, (1992), pp. 21–37.

[۱۲] آدابی م. ح.، *"ژئوشیمی رسوبی"*، انتشارات آرین زمین، (۱۳۸۳)، ۴۲۱ص.

[13] Simo J.A., Johnson C.M., Vandrey M.R., Brown P.E., Castrogiovanni E., Drzewiecki P.E., Valley J.W., Boyer J., *"Burial dolomitization of the Middle Ordovician Glenwood Formation by evaporitic brines, Michigan Basin"*, In: Purser, B., Tucker, M. and Zenger, D. (Eds.), Dolomites — A Volume in Honor of Dolomieu, International Association of Sedimentology, Blackwell Scientific Publications, Cambridge, Special Publications 21, (1994), pp. 325–341.

[14] Tucker M., *"Techniques in sedimentology"*, Blackwell Scientific Publications., Oxford, (1988), 394 p.

[15] Morrow D.W., *"Dolomite-Part 2: dolomitisation models and ancient dolostone*s*"*, In: Mcllreath, I.A. and Morrow, D.W. (Eds.), *"Diagenesis"*, Geoscience Canada, Reprint Series 4, (1990), pp. 125–164.

[16] Tucker M.E., Wright V.P., *"Carbonate Sedimentology"*, Blackwell Science, Oxford, (1990), 482 p.